

DOI: 10.3901/JME.2019.23.083

多模式两轮移动机器人的设计与运动分析*

何妍颖 李晔卓 武建昀 刘兴杰 姚燕安
(北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044)

摘要: 提出一种具有可变形车身的多模式两轮移动机器人。以平面 6R 单环闭链连杆机构为车身, 通过控制其变形运动, 使机器人具有折展模式和三种移动模式。在折展模式下, 折叠状态时用于储运和携带, 展开状态时启动工作模式。在两轮移动模式下, 车身变形形成车尾支撑实现稳定移动, 通过调整轮距和车尾长度以增强其地面适应性。在攀爬越障模式下, 通过车身变形至类爪状以增强对障碍物的攀附作用, 实现台阶越障。在类履滚动模式下, 通过杆件在地面交替铺展支撑以增加与地面接触面, 实现在不平整或松软路面上的滚动。对所设计构型进行自由度分析和驱动配置。建立运动学模型, 分析机器人运动参数并对其进行步态规划。建立动力学仿真模型, 验证预设步态合理性。研制一台样机, 对其折展模式和三种移动模式进行可行性验证。

关键词: 多模式; 两轮移动机器人; 变形机构; 多地形适应能力

中图分类号: TP242

Design and Mobility Analysis of a Multi-mode Two-wheel Mobile Robot

HE Yanying LI Yezhuo WU Jianxu LIU Xingjie YAO Yanan

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: A novel multi-mode two-wheel mobile robot with a chassis based on the planar single-loop 6R linkage mechanism is proposed. According to the motion control of the deformation of chassis, four modes can be generated. The deployable mode, where it can be retracted for transportation and expanded for working; the two-wheel mode where the tail length and wheel base can be adjusted to get a better adaptability for complex terrain; the quasi-track rolling mode for rough and soft road surface and the climbing mode for obstacle crossing. The design and analysis of mechanism is given. Based on kinematics calculation, the mobile parameters are analyzed and the motion gaits are planned. The simulation model is established and the correctness of theoretical analysis is proved. A prototype is fabricated to verify the workability of the deployable mode and the three mobile modes.

Key words: multi-mode; two-wheel mobile robot; deployable structure; obstacle crossing

0 前言

微小型地面移动机器人被广泛应用于救援、科考以及侦察, 其工作环境往往为人类难以到达的危险狭小空间^[1], 这要求机器人在满足小体积小重量的同时具有较强的多地形适应能力^[2]。

两轮机器人具有高机动性、紧凑结构和轻小质量等优点, 通过添加辅助运动机构或者对车轮和车身进行变形设计可以提高机器人越障能力。STOETER^[3-4]研制了带弹簧足的 Scout 机器人通过弹射进行越障, 周伟等^[5]设计出 MSTRbot 机器人带有两自由度机械手臂用以辅助越障, KRATOCHVI

等^[6]设计的 MegaScout 可根据不同环境需求更换轮子以适应不同地形。此外, KARRAS 等^[7]提出的 Puffer 机器人可通过车身折叠变形减小机器人净高以通过小于其轮径的矮缝。

履带类复合型机器人在具有普通履带机器人高越障性特点的同时更为灵活。轮履腿复合机器人 AZIMUT^[8]、Viper 机器人^[9]、LI^[10]开发出的轮履复合移动机器人以及 ZHOU 等^[11]提出的变形轮履机器人, 其运动构件均可在不同模式间进行切换以适应地形。

整体闭链连杆移动机构可通过自身变形改变质心位置实现运动。刘长焕等^[12-13]分别提出平面 4R 和 6R 滚动机构, LEE 等^[14-17]提出多环闭链滚动机器人, TIAN 等^[18-20]先后提出空间 8R 滚动机构、3-RRR 并联滚动机构, 李晔卓等^[21-23]提出的 4-RSR

* 科工局稳定支撑资助项目(HTKJ2019KL502017)。20190131 收到初稿, 20190605 收到修改稿

并联滚动机构可实现多种移动功能模式的切换以及移动与操作功能的一体化设计。

基于对小型移动机器人体积、质量和越障性能的综合考量,充分发挥整体闭链连杆机构的变形特性,综合轮式机器人的快速移动能力与履带式机器人的地形适应性,提出一款以整体闭链连杆机构为车身的新型多模式两轮移动机器人。使机器人结构保持小质量、小体积的同时,通过车身变形使其具有折展、两轮移动、类履滚动和攀爬越障四种模式,可兼顾移动快速性和地形通过性。

对该新型多模式两轮移动机器人进行结构设计、运动学以及运动能力分析,并通过理论计算和虚拟样机仿真对机器人移动参数进行分析和验证,最后通过实物样机对机器人设计的合理性和运动的可行性进行验证。

1 机器人构型设计

1.1 构型设计

当机器人面对高度较小的障碍物时,如小于车轮轮径的台阶,只需要通过移动构件即可完成越障,如人在爬楼梯时,只需借助腿部小量的抬高以及向前运动即可完成动作。当台阶较高时,人需要借助双手,通过手与地面的作用力,对障碍物产生攀附作用,使人的整体质心往台阶上移,完成高台阶翻越过程。从人攀爬高台的步态中提取出凹多边形越障步态,如图 1 所示,由此确定机器人的基本结构为具有类似变形能力的单环闭链连杆机构。



图 1 人攀爬高台步态

结合已有移动机器人特性,将轮式结构与可变形车身进行叠加,设计一款多模式两轮移动机器人,使其具有轮式快速移动能力,履带式高越障性以及整体闭链移动连杆机构的强大变形能力。

多模式两轮移动机器人结构原理如图 2 所示。选取变形能力较强,结构具有对称性且自由度较少的平面 6R 单环闭链连杆机构为可变形车身(后文简称 6R 车身),将两个车轮与其中两个对称位置的杆件以转动副连接。

根据自由度公式^[24] $M=d(n-g-1)+\sum f_i$,得到 6R 车身自由度为 3,需要 3 个电动机驱动完成变形,

为了保证机器人整体结构对称性,将 3 个电动机间隔配置,如图 2 中黑色圆圈所示位置。为实现差速转动,两个车轮分别用两个电动机实现独立驱动。

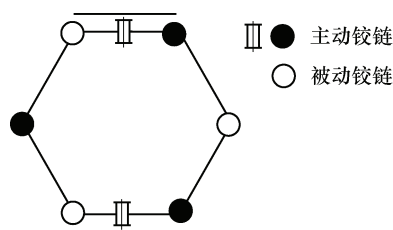


图 2 机器人结构原理图

1.2 多模式功能介绍

根据机器人结构特点,为其设计了四种功能模式:可用于折叠存放的折展模式、可在平地快速运动的两轮模式、可在非平整路面运动的类履滚动模式可进行台阶攀爬的攀爬越障模式。

为实现各个模式,对机器人进行机械设计,见图 3。车身在非运动状态下处于折叠模式,在保证机器人刚度的同时,为避免折叠过程和运动过程中零件之间造成干涉,对样机进行了分层设计,除与轮子相连的杆件以外,其他杆件拆分为完全相同的两部分并对称布置在电动机外侧。其机械结构具有对称性,便于进行步态预设。在机架关节处可安装摄像头和传感器,通过多摄像头布置和 360° 全景环摄技术^[25]实现各移动模式下的图像处理和环境感知,从而实现机器人自主越障。

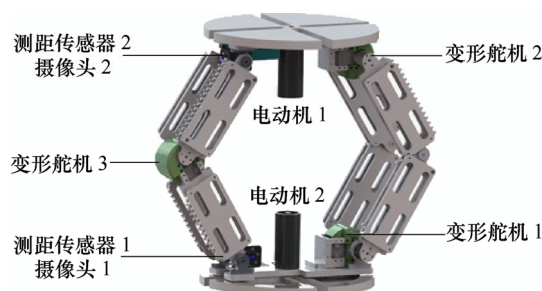
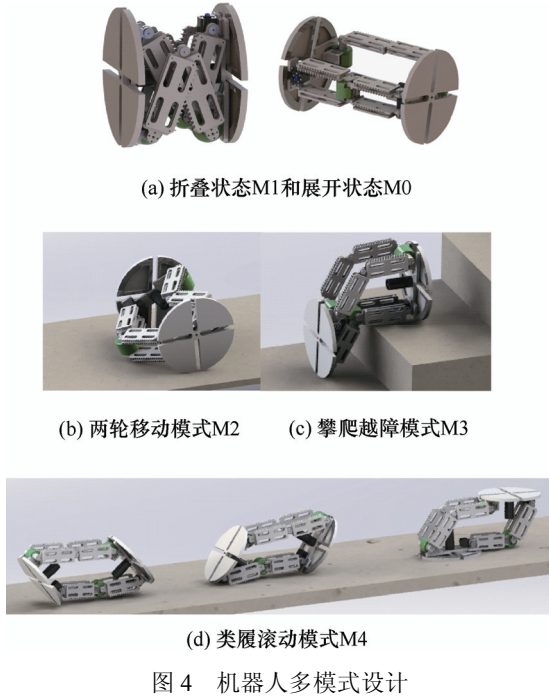


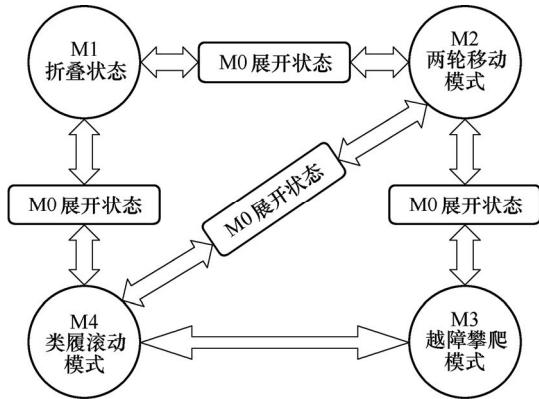
图 3 机器人设计总图

机器人各模式如图 4 所示。在折展模式下,机器人有折叠和展开两种状态,在折叠状态 M1 下利于携带且便于储存,展开状态 M0 为各模式切换的过渡状态。在两轮移动模式 M2 下,6R 车身通过变形可形成车尾,在运动过程中与地面接触,提供两轮移动机器人移动所需的地面支撑力,同时车身变形还可调整轮距和车尾长度以适应不同的地形环境。在攀爬越障模式 M3 下,通过控制 6R 车身变形至具有攀附能力的凹多边形,再通过不断变形使机器体质心偏移从而实现台阶攀爬运动。在类履滚动模

式 M4 下, 通过车身变形, 可使车身杆件依次与地面接触, 实现支撑杆件的连续交替滚动。



机器人各个模式之间的切换策略如图 5 所示。



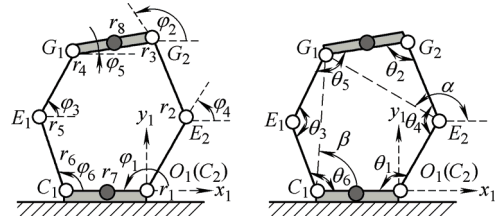
各模式之间有的可以直接进行切换, 有的需要首先切换至过渡状态或者其他模式, 然后才能换到目标模式。

机器人初始状态为折叠状态 M1, 折叠状态 M1 展开即为展开状态 M0。两轮移动模式 M2 可通过展开状态 M0 变形获得, 在展开状态下, 首先控制车身从矩形变成凹多边形, 然后驱动车轮便可获得稳定两轮移动模式。攀爬越障模式 M3 只能通过类履带滚动模式切换而得, 在障碍物前, 通过类履带滚动调整至其中一车轮着地, 从而开启越障攀爬模式。类履带滚动模式 M4 可通过展开状态 M0 直接变形获得, 在展开状态下锁死车轮驱动电动机, 依靠变形电动机工作驱动车身变形进行类履带滚动。

2 运动学分析

2.1 运动学模型

如图 6 所示对多模式两轮移动机器人建立运动学模型。以 C_1C_2 方向为 x 轴方向, 以杆件端点 C_2 为坐标原点 O_1 , φ_i 表示各杆件与 x 轴夹角, θ_i 表示相邻杆件夹角。已知该机构自由度为 3, 选择 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 作为主动驱动角。车身驱动舵机安装在关节处, 在未安装舵机的地方添加配重以保持整机质量分布均匀。两个轮式驱动电动机分别安装在上下平台中间, 杆件重量与驱动零件相比可忽略不计, 杆件重量可被视为集中在关节处, r_i 表示各杆件等效质心点位置, 其中 $r_1 \sim r_6$ 处质量为 m_1 , r_7 和 r_8 处质量为 m_2 。



各杆件等效质心位置如下

$$\begin{aligned} r_1 &= [0 \quad 0]^T \\ r_2 &= [l \cos(\varphi_4) \quad l \sin(\varphi_4)]^T \\ r_3 &= [l(\cos(\varphi_4) + \cos(\varphi_2)) \quad l(\sin(\varphi_4) + \sin(\varphi_2))]^T \\ r_4 &= [l(\cos(\varphi_4) + \cos(\varphi_2) - \cos(\varphi_5)) \quad l(\sin(\varphi_4) + \sin(\varphi_2) - \sin(\varphi_5))]^T \\ r_5 &= [l(\cos(\varphi_1) + \cos(\varphi_6)) \quad l(\sin(\varphi_1) + \sin(\varphi_6))]^T \\ r_6 &= [l \cos(\varphi_1) \quad l \sin(\varphi_1)]^T \quad r_7 = \left[\frac{l \cos(\varphi_1)}{2} \quad \frac{l \sin(\varphi_1)}{2} \right]^T \\ r_8 &= [l(\cos(\varphi_4) + \cos(\varphi_2) - \frac{\cos(\varphi_5)}{2}) \quad l(\sin(\varphi_4) + \sin(\varphi_2) - \frac{\sin(\varphi_5)}{2})]^T \end{aligned}$$

可列出闭环矢量方程

$$C_2 E_2 + E_2 G_1 = C_2 C_1 + C_1 G \quad (1)$$

$E_2 G_1$ 和 $C_1 G_1$ 长度分别为 l_1 、 l_2 , 与 x 轴之间的绝对夹角分别为 α 和 β , 由式(1)可得如下表达式

$$\begin{aligned} \alpha &= \arccos \frac{l_2^2 - l_1^2 - 2l^2(1 - c\theta_1)}{2l_1 \sqrt{2(1 - c\theta_1)}} - \arctan \frac{s\theta_1}{1 - c\theta_1} \\ \beta &= \arccos \frac{l_2^2 - l_1^2 + 2l^2(1 - c\theta_1)}{2l_2 \sqrt{2(1 - c\theta_1)}} - \arctan \frac{s\theta_1}{1 - c\theta_1} \quad (2) \end{aligned}$$

$$s\theta_i = \sin \theta_i \quad c\theta_i = \cos \theta_i$$

$$l_1 = l\sqrt{2(1-c\theta_2)} \quad l_2 = l\sqrt{2(1-c\theta_3)}$$

结合式(1)、(2), 可得机体质心表达式

$$\begin{aligned} G_x &= \frac{\sum_{i=1}^8 m_i r_{xi}}{\sum_{i=1}^8 m_i} = \frac{am_1l + bm_2l}{6m_1 + 2m_2} \\ G_y &= \frac{\sum_{i=1}^8 m_i r_{yi}}{\sum_{i=1}^8 m_i} = \frac{cm_1l + dm_2l}{6m_1 + 2m_2} \end{aligned} \quad (3)$$

$$a = 2\cos\varphi_1 + 3\cos\varphi_2 + 4\cos\varphi_4 - \cos\varphi_5 + \cos\varphi_6$$

$$b = \frac{\cos\varphi_1}{2} + \cos\varphi_2 + \cos\varphi_4 - \frac{\cos\varphi_5}{2}$$

$$c = 2\sin\varphi_1 + 3\sin\varphi_2 + 4\sin\varphi_4 - \sin\varphi_5 + \sin\varphi_6$$

$$d = \frac{\sin\varphi_1}{2} + \sin\varphi_2 + \sin\varphi_4 - \frac{\sin\varphi_5}{2}$$

根据几何关系, 可得 φ_i 和 θ_i 关系以及非主动驱动角表达式

$$\begin{aligned} \theta_4 &= \frac{5\pi}{2} - \theta_1 - \frac{\theta_2}{2} - \alpha \quad \theta_5 = \pi - \frac{\theta_2 + \theta_3}{2} + \alpha - \beta \\ \theta_6 &= \frac{\pi - \theta_3}{2} \quad \varphi_1 = \pi \quad \varphi_2 = \alpha - \frac{\pi - \theta_2}{2} \quad \varphi_4 = \pi - \theta_1 \\ \varphi_3 &= \beta - \frac{\pi - \theta_3}{2} \quad \varphi_5 = \alpha - \frac{\pi + \theta_2}{2} \quad \varphi_6 = \frac{\pi - \theta_3}{2} + \beta \end{aligned} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)可以得出驱动角与机器人质心间的关系, 用于后续的运动学分析

2.2 折展模式分析

机器人在最大展开状态下的尺寸与最小折叠状态下的尺寸之比为折展比。折展比所表示的机器人变形能力大小, 可以反映其物理环境的适应能力。如图7所示, 取6R车身的杆件长度为160 mm。由于关节尺寸的影响同时为保证两轮移动模式正常运行, 车轮直径需略大于杆件长度, 取220 mm。根据机器人运动学模型、转动副转角范围与杆件尺寸参数的设定, 可得该机器人外形缩放比可达到2:1。

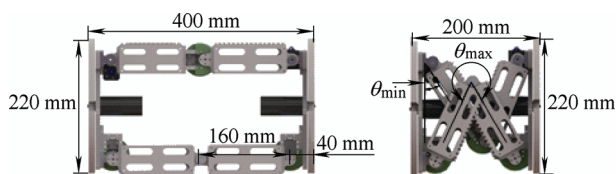


图7 折展模式缩放对比图

2.3 两轮移动模式分析

2.3.1 两轮转弯半径分析

如图8所示, 已知 v_L 和 v_R 分别为左右车轮外侧

线速度, ω_L 和 ω_R 分别为左右侧车轮角速度, ω_r 为整车转弯角速度, r 为转弯半径, B 为左右车轮间距, R 为车轮半径。可得出以下关系式

$$\begin{aligned} v_L &= \omega_L R \quad v_R = \omega_R R \quad \omega_r = \frac{v_R - v_L}{B} \\ r &= \frac{v_L}{\omega_r} + 0.5B = \frac{v_R}{\omega_r} - 0.5B = \frac{v_L + v_R}{2\omega_r} = \frac{B(v_L + v_R)}{2(v_R - v_L)} \\ B &= 2L \sin \frac{\theta_3}{2} \end{aligned}$$

由此可得

$$r = \frac{(v_R + v_L)L \sin \frac{\theta_3}{2}}{v_R - v_L} \quad (5)$$

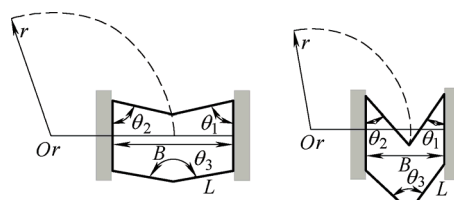


图8 轮式转弯半径分析

当左右车轮转速相同时, 转动半径无限大, 小车直线行走。当左右两轮车速不一样时可以进行差速转弯运动。通过车身变形电动机控制机器人形状, 可以控制其转弯半径大小, 使机器人的运动更加灵活。如图8所示, 车身变形越大, 其转弯半径越小。为保证机器人的正常运行, 规定两轮移动模式下的驱动角(其中, 定义 θ_1 为主驱动角, θ_2 和 θ_3 为副驱动角)的角度关系和变化范围如下

$$20^\circ \leq \theta_1 = \theta_2 \leq 70^\circ \quad 40^\circ \leq \theta_3 = 2\theta_1 \leq 140^\circ$$

2.3.2 两轮移动爬坡能力分析

移动机器人运动稳定性对其运动性能有重要意义。由夏旭峰等^[26]对仿生机器人稳定性分析的总结可得, 在不平坦路面, 无惯性力和外载荷影响的情况下, 静态稳定边界法^[27]最为简单有效。机器人在运动过程中的稳定区域为机器人与地面接触面的垂直投影, 若机体重心的垂直投影位于该支撑区域内, 则机器人是静态稳定的。本文假设机器人在所有越障过程中没有惯性力, 即其运动状态为静态平衡, 对其进行静态稳定性分析。

多模式两轮移动机器人以两轮移动模式爬坡时, 其支撑区域位于车轮触地点和车尾触地点之间。当坡度过高时, 机器人的重心会偏出支撑区域, 机器人会发生翻转无法正常爬坡, 此时的临界值为最大可爬斜坡角度理论值。机器人的整体支撑范围会随车架形状变化而发生改变, 该过程运动学模型如图9所示。

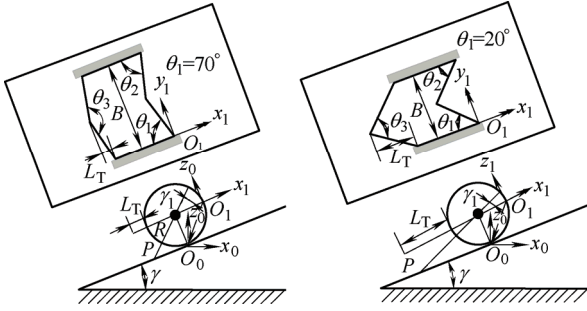


图9 轮式爬坡分析

在爬坡状态下, 图 6 所示的运动学坐标系 $O_1x_1y_1$ 会随车体发生移动, 为了计算机器人在爬坡状态下在定坐标系 $O_0x_0y_0$ 下的值, 需要进行坐标转换计算。可得在爬坡状态下, 机器人质心表达式为

$$\mathbf{G}_{R_0} = \mathbf{A}_0^1 \mathbf{G}_{R_1} \quad (6)$$

如图 9 所示, 坐标转换矩阵 \mathbf{A}_0^1 计算如下

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_0^1 &= \text{Trans}(dx, 0, dz) \cdot \text{Rot}_{y_0}(\gamma) = \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dx \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ dx &= \sqrt{R} \cos\left(\frac{\pi}{4} + \gamma\right) \quad dz = \sqrt{R} \sin\left(\frac{\pi}{4} + \gamma\right) \end{aligned} \quad (7)$$

在爬坡过程中, 若质心超出支撑杆件支撑范围, 则会发生向后的倾倒, 因此质心横坐标不能超过其支撑范围左边界 P 点的横坐标, 即质心位置必须满足条件

$$Gx_0 \geq Px_0 = -\cos \gamma \sqrt{\left(L \sin\left(\frac{\theta_3}{2}\right) + R\right)^2 - R^2} \quad (8)$$

可以得到质心随主驱动角 θ_1 和坡度 γ 变化的变化情况如图 10 所示, 其中实线和虚线分别表示主驱动角 $\theta_1=20^\circ$ 和 $\theta_1=70^\circ$ 时质心横坐标值随坡度 γ 的变化情况。

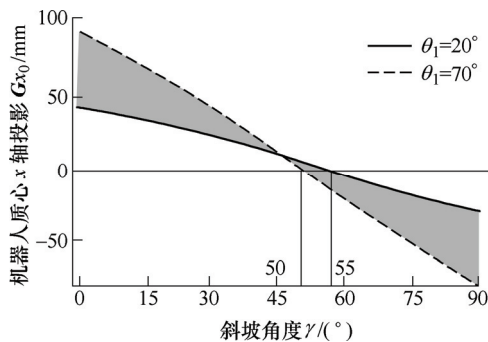


图10 机器人两轮移动爬坡能力分析结果

主驱动角角度变化使机器人具有不同的车尾长度, 图 10 所示阴影部分为驱动角变化过程中质心变

化范围。曲线与横坐标的交点表示此时机器人质心与支撑区域边界重合, 当坡度继续增大时, 质心将超出支撑范围使机器人发生向后的倾倒。当 $\theta_1=20^\circ$ 时, 可得机器人在两轮移动模式下的最大可爬坡度, 即摩擦力为理想情况时, 机器人不发生翻倒的最大坡度为 55° 。主驱动角 θ_1 越小, 移动机器人车尾越长, 支撑范围越大, 可攀爬的坡度也会越大, 因此可取车身发生最大变形量的极限状态, 即 $\theta_1=20^\circ$ 时为两轮斜坡攀爬状态。

2.4 类履滚动模式分析

在类履滚动模式下, 车身发生变形, 机器人所有杆件依次与地面接触产生滚动。该运动模式与地面接触面较大, 摩擦力较大, 运动较稳定, 适用于坎坷不平路面或松软的沙石路面。其滚动步态如图 11 所示, 当 $\gamma=0$ 时, 即为平地类履滚动。图中所示三种步态为一个完整滚动步态周期, 每两个步态间的切换只需要其中两个驱动角发生变化, 设定 $\omega_1=\omega_2$, 为保证机器人运动的连贯性, 规定在类履滚动步态下杆件夹角最小为 30° 。

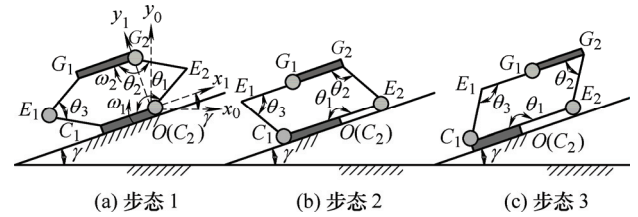


图11 类履带滚动爬坡

要顺利完成滚动运动, 需要保证机器人在斜坡上不会发生后倾。在图 11 所示三种步态中, 通过分析可得在步态 1 下质心最靠近支撑区域边缘, 最容易发生倾翻, 所以以此状态为约束下界计算机构不发生翻转的最大坡度, 如图 12 所示在该步态下机器人可爬坡度最大角度约为 63° 。

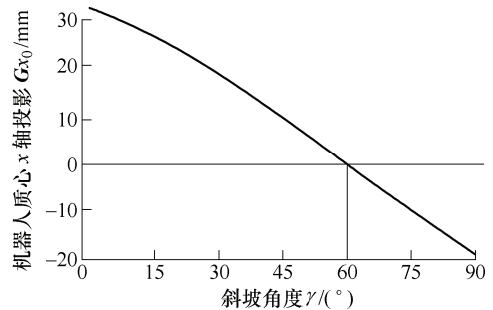


图12 机器人履带模式稳定爬坡分析结果

在步态 3 下, 若机器人要继续向上滚动, 必须保证此时质心位于 C_2E_1 范围内, 即质心 x 方向投影大于 0。对该步态下机器人整体质心随坡度的变化情况进行分析便可得到机器人滚动爬坡的理论最大

坡度值。将图 6 所示坐标进行旋转以得到此时机体质心坐标值, 旋转矩阵

$$\mathbf{B}_0^1 = \text{Rot}_{z_0}(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (9)$$

通过旋转坐标计算得出该步态下 ($\theta_1=165^\circ$, $\theta_2=165^\circ$, $\theta_3=30^\circ$) 机器人质心随坡度变化如图 13 所示, 机器人若要稳定持续运动, 坡度不能大于 60° 。综上所述, 机器人在类履带滚动状态下, 当规定其杆件最小夹角为 30° 且摩擦力情况理想时, 机器人可稳定攀爬的最大坡度理论值为 60° 。

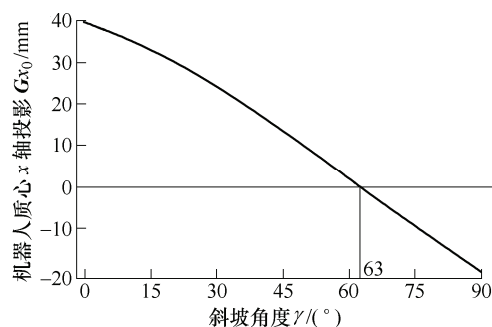


图 13 机器人履带滚动模式最大爬坡角度计算

2.5 攀爬越障模式分析

2.5.1 步态分析

机器人台阶攀爬步态如图 14 所示, 图 14a 为机器人爬垂直墙初始位置, 此时机器人下平台着地, 整体形态呈长方形; 图 14b 为机器人发生凹多边形变形; 图 14c 表示机器人继续变形至质心超出支撑区域的状态, 此时机器人翻倒并与台阶上平台接触; 图 14d 表示机器人杆件发生形变, 进入攀爬状态; 图 14e 表示 θ_2 继续增大, 直至机器人左边部分离地, 机器人质心落到垂直墙上平台上, 此时攀爬动作成功完成; 图 14f 表示机器人在台阶上平台上变形至初始位置。

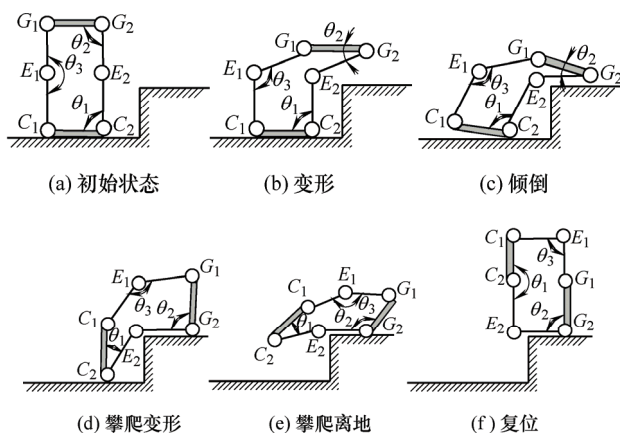


图 14 台阶越障步态

6R 变形车身在攀爬过程中发生了较大形变, 为了避免机器人在运动过程中出现卡死和干涉现象, 规定两杆件之间的夹角最小为 20° 。对步态图 14b 作出规定, 规定在 θ_2 运动到最小值的过程中保持 C_1E_1 和 C_2E_2 呈竖直状态, 此时 $\angle C_2E_2G_2$ 为最大值, θ_3 为最小值。通过计算可得出在整个越障过程中关键角的变化范围

$$20^\circ \leq \theta_1 \leq 170^\circ \quad 20^\circ \leq \theta_2 \leq 170^\circ$$

$$110^\circ \leq \theta_3 \leq 180^\circ \quad 180^\circ \leq \theta_4 \leq 250^\circ$$

2.5.2 最大台阶攀爬高度计算

根据台阶攀爬步态, 机器人在翻倒时, 支撑杆件由 C_1C_2 转换为 E_2G_2 , 在此过程中, 需要台阶上平台为机器人提供足够的支撑力与摩擦力才可以阻止机器人向下滑落, 在发生变形和攀爬时需要使质心移至 C_2 与 G_2 点之间。从几何关系来看, 机器人能成功越障的关键条件为 G_2 点能与台阶上平台接触。定义机器人翻倒后, 杆件 E_2G_2 与台阶的接触角为 ϕ , 若 $\phi > 0$, 台阶太高使杆件 G_2 点无法与台阶接触, 在后续的翻转过程中机器人会滑落; 若 $\phi \leq 0$, 如图 15 所示, 机器人可以完成该高度的越障, 可得出 C_2 点至杆 E_2G_2 的垂直距离即为机器人的最大台阶攀爬高度, 其计算公式如下

$$H_{\max} = l \sin \left(\alpha + \theta_1 + \frac{\theta_2}{2} - \frac{\theta_3}{2} \right) \quad (10)$$

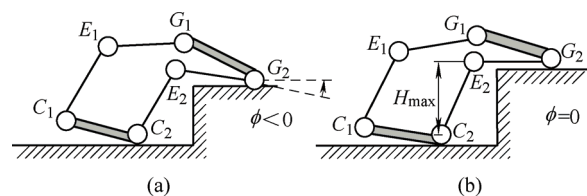


图 15 最大台阶攀爬高度分析

设定 $\theta_2=20^\circ$, 且 θ_3 、 θ_1 以相同角速度运动, 当 θ_1 转到约 100° 时, 质心在水平方向的值变为正值, 表示质心已超出杆件 C_1C_2 支撑范围, 发生翻转, 此时对应的高度 H 即为机器人最大台阶攀爬高度约为 70 cm (当杆件长取 80 mm 时, 如图 16 所示), 即杆

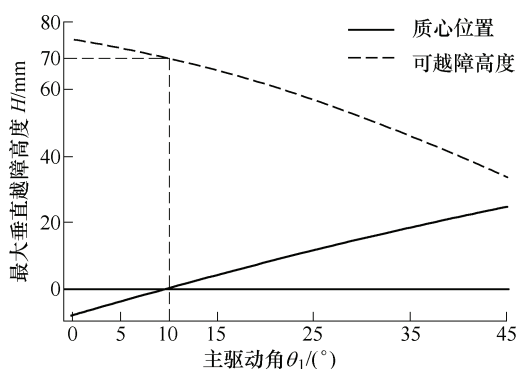


图 16 最大台阶攀爬高度计算结果

件长度的 87.5%。机器人以凹多边形进行台阶攀爬时具有较强的越障能力。

2.5.3 越障接近距离分析

定义机器人开始越障时与台阶的距离为接近距离。根据机器人台阶攀爬步态,机器人在变形过程中,质心不断向台阶方向偏移,只有当机器人质心能移到台阶上平台时,与地面接触的 C_2 点才可以离开地面以完成攀爬过程。因此需要保证机器人接近距离在一定范围内,以便当机器人翻倒后杆件与上平台接触面足够大,以提供足够的支撑区域使机器人质心偏移到台阶上。

为得到机器人在成功越障情况下的最大接近距离,计算机器人在最大变形量的状态下的质心位置。如图 17 所示建立接近距离计算数学模型。在机器人发生翻转以后,原有坐标系会随着杆件 C_1C_2 旋转,为了得到机器人整体质心在定坐标系 $O_0X_0Y_0$ 中的数值,需要进行坐标转换计算。两个坐标轴之间的角度随驱动角 θ_1 的变化关系为 $\lambda=\pi-\theta_1-\lambda_0$, 其中, λ_0 为刚翻倒时 C_2E_2 与水平面的夹角, $\lambda_0=\pi-\theta_{10}-\phi_0$, θ_{10} 是机器人翻倒瞬间 θ_1 角度, ϕ_0 为机器人翻倒时 C_1C_2 与地面夹角,按照最大台阶越障高度情况计算,此时 $\phi_0=20^\circ$ 。

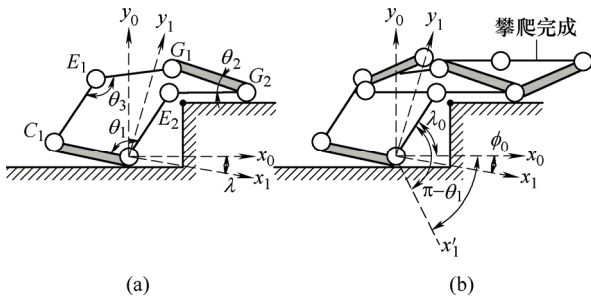


图 17 机器人攀爬过程坐标图

在定坐标系 $O_0X_0Y_0$ 下,所有点的坐标需要乘以坐标变化矩阵,可得旋转后的坐标计算公式

$$Gx_0 = \cos \lambda Gx_1 - \sin \lambda Gy_1 \geq 0 \quad (11)$$

攀爬过程中,当达到如图 17b 中所示“攀爬完成”姿态时,机器人变形达到极限($\theta_1=20^\circ$, $\omega_1=\omega_2$, $\theta_3=180^\circ$),同时该姿态也是其质心在现有约束情况下最偏右的情况,计算得到此时整体质心水平位置为 12.7 mm,即杆长的 15.88%,该数值即为机器人与台阶障碍物之间的最大接近距离,即在实际越障时,接近距离小于该值才可以保证机器人能成功完成最大台阶高度越障。对于其他较矮的台阶,在该值以内也可以保证越障成功性。此数值可为机器人的越障姿态准备提供参考。

3 仿真验证

在 ADAMS 中搭建虚拟样机仿真模型,设置仿真参数,对机器人两轮移动爬坡运动、类履滚动爬坡运动和台阶攀爬运动进行仿真分析,得到仿真环境下的运动参量。

如表 1 所示为理论计算值与仿真得出的参数对比。如图 18 所示,在理想摩擦力时(在仿真中通过轮面形状设计增大与地面间的摩擦力),该机器人在两轮状态下最大爬坡度可以达到 52° 。如图 19 所示,由仿真结果可得,该机器人在类履带模式下爬坡最大爬坡度理论值可以达到 52° ,机器人质心在该情况下可以依靠机器人形变落到下一根杆件上。如图 20 所示,该机器人在攀爬越障模式下可爬最大台阶高度为车身有效杆长的 80%(考虑实际车轮厚度和关节尺寸影响,杆件有效长度为 200 mm,可翻越垂直墙高度为 160 mm),与台阶的最大接近距离为车身实际杆长的 12.5%(25 mm)。

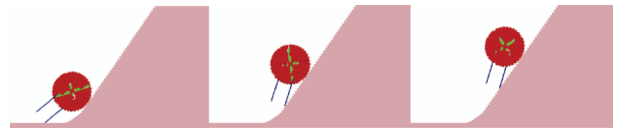


图 18 两轮移动爬坡仿真



图 19 类履滚动爬坡仿真

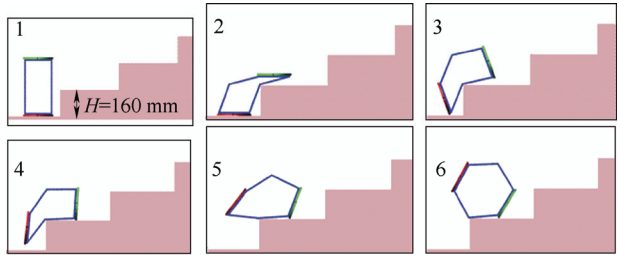


图 20 台阶攀爬仿真

表 1 中仿真值与理论值之间的值误差因杆件结构设计产生,可以此作为机械结构设计的参考,并

表 1 理论计算/仿真结果

移动模式	性能参数	仿真值	理论计算值	误差 (%)
两轮移动	最大爬坡角度/(°)	52	55	5.45
类履滚动	最大爬坡角度/(°)	52	60	13.3
攀爬越障	最大台阶攀爬高度与杆长比值(%)	80	87.5	8.6
	接近距离与杆长比值(%)	12.5	15.88	21.7

验证多模式两轮移动机器人的运动学模型的正确性以及对其越障能力分析的合理性。

4 样机试验

根据理论分析以及仿真结果验证了机器人设计的合理性, 对该多模式两轮移动机器人进行工程设计, 加工制造出原理样机, 如图 21 所示。

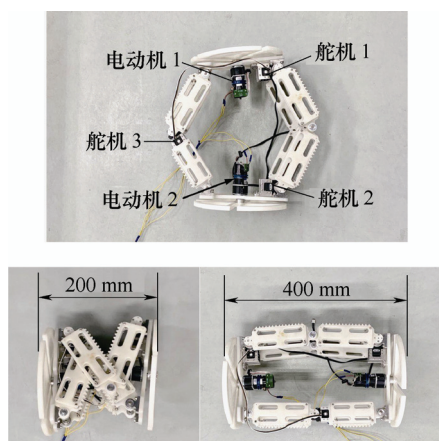


图 21 机器人样机实物图

表 2 为样机详细情况。总质量为 2.8 kg, 杆件材料为工程塑料, 关节材料为铝合金。完全展开时机器人最大高度为 400 mm, 完全折叠时高度为 200 mm, 折展比可达 2:1。

表 2 样机信息表

参数	内容
质量/kg	2.8
材料	工程塑料, 铝合金
舵机型号	Dynamixel AX12A
电动机型号	冯哈勃 2342L012
工作电压/V	9.6
高度/mm(展开/折叠)	400/200

对样机搭建控制系统并完成两轮移动爬坡, 类履滚动以及台阶攀爬试验。

如图 22 所示为样机两轮移动爬坡试验, 经试验验证, 机器人在两轮移动模式下可以完成 9° 斜坡攀爬。



图 22 两轮移动爬坡试验

如图 23 所示, 机器人可以顺利完成类履滚动步态, 图示为一个完整滚动周期。

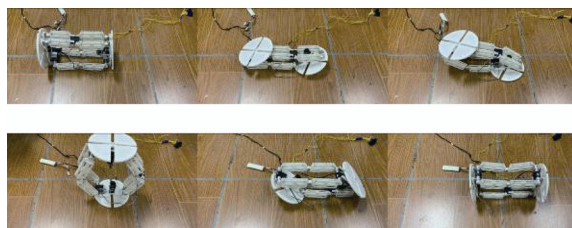


图 23 类履滚动试验

如图 24 所示为样机台阶攀爬试验, 试验台阶高度为 150 mm, 机器人能按照设计好的步态进行连续完整的越障运动。图 24 所示 1~6 分别对应机器人台阶攀爬的 6 个子步态。

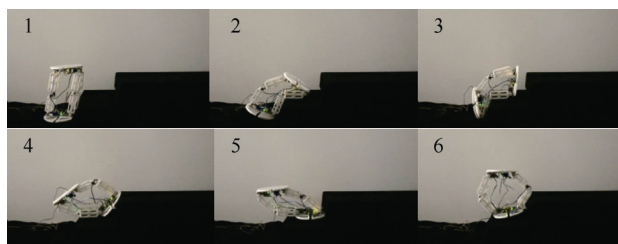


图 24 台阶攀爬试验

5 结论

(1) 提出以平面 6R 单环闭链连杆机构作为可变形车身的小型地面多模式两轮移动机器人, 实现了多种功能模式的集成与切换。机器人通过车身变形可获得 4 种模式: 用于储运、携带和工作模式切换的折展模式, 用于快速移动的两轮移动模式, 用于不平整和松软路面运动的类履滚动模式, 以及针对高台和连续台阶等障碍的攀爬越障模式。

(2) 通过可变形车身设计实现车身与车尾的一体化结构设计并使机器人拥有变形越障能力。通过 6R 连杆变形车身实现轮距和车尾长度的调整, 用以改变移动机构的转弯半径和车身宽度, 增加其地面狭小环境的适应性; 通过车身凹多边形变形可实现连续楼梯攀爬, 使机器人具有高地形适应力。

(3) 对机器人建立理论分析模型, 对两轮移动和类履移动模式进行了运动学动力学法分析, 对越障爬楼过程进行了步态规划, 并通过对关键步态的力学分析设定机构的运动约束条件和机构尺寸条件。以此为基础, 通过虚拟样机仿真与原理样机试验验证其理论分析结果, 证明了该移动机构的适用性与可行性。

参考文献

- [1] 刘金国, 王越超, 李斌, 等. 灾难救援机器人研究现状、关键性能及展望[J]. 机械工程学报, 2006, 42(12): 1-12.

- LIU Jinguo, WANG Yuechao, LI Bin, et al. Research status, key performance and prospect of rescue robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(12): 1-12.
- [2] RICHTER L, SCHILLING K, BERNASCONI M C, et al. Mobile micro-robots for scientific instrument deployment on planets[J]. Robotics and Autonomous Systems, 1998, 23(1-2): 107-115.
- [3] STOETER B S A, RYBSKI P E, PAPANIKOLOPOULOS N. Autonomous stair-hopping with scout robots[C]// IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sept 30- Oct 4, 2002, Lausanne, Switzerland. Piscataway: IEEE, 2002: 721-726.
- [4] HOUGEN D F, BENJAAFAR S, BONNEY J C, et al. A miniature robotic system for reconnaissance and surveillance[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 24-28, 2000, San Francisco, CA, USA. Piscataway: IEEE, 2002: 501-507.
- [5] 周伟, 石为人, 李江波, 等. MSTRbot: 一种小型侦察机器人[J]. 机器人, 2011, 33(5): 592-598.
- ZHOU Wei, SHI Weiren, LI Jiangbo, et al. MSTRbot: A small scout robot[J]. Robot, 2011, 33(5): 592-598.
- [6] KRATOCHVIL B, BURT I T, DRENNER A, et al. Heterogeneous implementation of an adaptive robotic sensing team[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sept. 14-19, 2003, Taipei, Taiwan, China. Piscataway: IEEE, 2003: 4264-4269.
- [7] KARRAS J T, FULLER C, CARPENTER K C, et al. Puffer: Pop-up flat folding explorer robot: USA, 15/272, 239[P]. 2017-03-30.
- [8] MICHAUD F, DOMINIC L, ARSENAULT M, et al. Multi-modal locomotion robotic platform using leg-track-wheel articulations[J]. Autonomous Robots, 2005, 18(2): 137-156.
- [9] YUVAL S, DAN R, AVISHAY N, et al. Adaptable traction system of a vehicle: USA, 07547078[P]. 2009-06-16.
- [10] LI Z, MA S, LI B. Development of a transformable wheel-track robot with self-adaptive ability[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(5): 1.
- [11] ZHOU F, XU X, XU H, et al. A multimodal hybrid robot with transformable wheels[C]// IEEE Real-time Computing and Robotics, July 14-18, 2017, Okinawa, Japan. Piscataway: IEEE, 2017: 139-144.
- [12] LIU C, YAO Y, LI R, et al. Rolling 4R linkages[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 48(1): 1-14.
- [13] 翟美丽. 单闭链 6R 连杆滚动机构的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- ZHAI Meili. Research on single-loop 6R linkage rolling mechanism[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [14] YIM M, DUFF D G, ROUFAS K D. PolyBot: A modular reconfigurable robot[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 24-28, 2000, San Francisco, CA, USA. Piscataway: IEEE, 2002: 514-520.
- [15] SHEN W M, KRIVOKON M, CHIU H, et al. Multimode locomotion via superbot reconfigurable robots[J]. Auton Robot, 2006, 20(2): 165-177.
- [16] LEE W H, SANDERSON A C. Dynamic rolling locomotion and control of modular robots[C]// IEEE Transactions on Robotics and Automation, Piscataway: IEEE, 2002: 32-41.
- [17] SUGIYAMA Y, HIRAI S. Crawling and jumping by a deformable robot[J]. The International Journal of Robotics Research, 2006, 25(5-6): 603-620.
- [18] TIAN Y, ZHANG D, YAO Y, et al. A reconfigurable multi-mode mobile parallel robot[J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 111: 39-65.
- [19] 田耀斌. 多模式移动连杆机构理论研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- TIAN Yaobin. Research on theories of mobile linkage with multiple locomotion modes[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [20] TIAN Y, YAO Y, WANG J. A rolling 8-bar linkage mechanism[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2015, 7(4): 041002.
- [21] 李晔卓. 可折叠地面移动连杆机构的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- LI Yezhuo. Research on foldable ground mobile linkage mechanisms[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [22] LI Y, YAO Y, CHENG J, et al. An agile assistant robot integrating operation and rolling locomotion[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2017, 44(1): 114-126.
- [23] LI Y, YAO Y, HE Y. Design and analysis of a multi-mode mobile robot based on a parallel mechanism with branch variation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 130: 276-300.
- [24] MCCARTHY J M. Geometric design of linkages[M]. Springer, 2010.
- [25] 肖潇, 方勇纯, 贺锋, 等. 未知环境下移动机器人自主搜索技术研究[J]. 机器人, 2007, 29(3): 224-229.
- XIAO Xiao, FANG Yongchun, HE Feng, et al. Autonomous search technology for mobile robots under unknown environment[J]. Robot, 2007, 29(3): 224-229.
- [26] 夏旭峰, 葛文杰. 仿生机器人运动稳定性的研究进展[J]. 机床与液压, 2007, 35(2): 229-234.
- XIA Xufeng, GE Wenjie. Research development on

motion stability of bionic robotics[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2007, 35(2): 229-234.

- [27] SONG S M, WALDRON K J. Machines that walk: The adaptive suspension vehicle[M]. Cambridge: MIT Press, 1989.

作者简介: 何妍颖, 女, 1994 年出生。主要研究方向为机构与机器人学。
E-mail: 16121298@bjtu.edu.cn

李晔卓(通信作者), 男, 1988 年出生, 博士后。主要研究方向为机构与机器人学。

E-mail: 11121434@bjtu.edu.cn

武建昫, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机构与机器人学。

E-mail: 13116343@bjtu.edu.cn

刘兴杰, 女, 1982 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机器人学。

E-mail: xingjie8002@163.com

姚燕安, 男, 1972 年出生, 教授。主要研究方向为机构与机器人学。

E-mail: yayao@bjtu.edu.cn